



## Comportement d'une bulle au sein d'un fluide à seuil

Gabriel Samson, Annabelle Phelipot-Mardelé, Christophe Lanos

### ► To cite this version:

Gabriel Samson, Annabelle Phelipot-Mardelé, Christophe Lanos. Comportement d'une bulle au sein d'un fluide à seuil. 31ème rencontres universitaires de l'AUGC, May 2013, France. pp.10. hal-00994173

**HAL Id: hal-00994173**

**<https://hal.science/hal-00994173>**

Submitted on 21 May 2014

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

---

# Comportement d'une bulle au sein d'un fluide à seuil

Samson G.<sup>1</sup>, Phelipot-Mardele A.<sup>1</sup>, Lanos C.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> UEB - LGCGM, Equipe Matériaux Thermo-Rhéologie, INSA-IUT, Rennes  
gabriel.samson@insa-rennes.fr

---

**RÉSUMÉ.** Les propriétés thermiques et mécaniques des matériaux cimentaires dépendent fortement de la présence de bulles d'air dans la matrice. Ces bulles sont formées à l'état frais dans les suspensions minérales adjuvantées dont le comportement rhéologique est caractérisé par la présence d'un seuil de cisaillement. L'étude de la formation, de la croissance, de la stabilité de bulles dans ces fluides à seuils est envisagée. Les travaux sont réalisés à l'aide d'un fluide à seuil modèle transparent dans lequel sont injectées les bulles d'air. Les essais révèlent que l'introduction d'un tensio-actif permet de stabiliser la paroi des bulles et conduit à la formation d'une membrane entre deux bulles au contact. Sa stabilité dépend du dosage en tensio-actif. Le risque de coalescence est alors maîtrisé. Un seuil de fluide élevé favorise la création de bulles sphériques. Cette sphéricité demeure élevée sur une gamme étendue de volume. Enfin, La stabilité des bulles dans un fluide à seuil se traduit par une forte anisotropie de la croissance des bulles avant leur remontée sous l'effet de la poussée d'Archimède.

**ABSTRACT.** The thermal and mechanical properties of cementitious materials strongly depend on the presence of air bubbles in the matrix. These bubbles are formed in a fresh state in the mineral suspensions whose rheological behaviour is characterized by the presence of a shear yield stress. The study of the formation, the growth, the stability of air bubbles in these yielded fluids is considered. Work is completed using a transparent model yielded fluid in which the air bubbles are injected. The tests reveal that the introduction of surfactant stabilizes the wall of the bubbles and leads to the formation of a membrane between two bubbles. Its stability depends on surfactant content. The risk of coalescence is then controlled. A fluid with high yield stress supports the creation of spherical bubbles. Its sphericity remains high on a wide range of volume. Lastly, the stability of the bubbles in a yielded fluid results in a strong anisotropy of the bubble growth before their rise under the effect of buoyancy.

**MOTS-CLÉS :** fluide à seuil, carbopol, coalescence, tensio-actif

**KEY WORDS :** yield stress fluid, carbopol, coalescence, surfactant

---

## 1. Introduction

Les matériaux cimentaires actuellement utilisés dans les applications bâtiments sont fabriqués à partir d'un mélange de constituants solides (généralement du sable, des graviers, des liants) de granulométrie variée et d'un fluide dispersant (généralement de l'eau). La présence de bulles au sein de tels fluides a des conséquences importantes sur les propriétés du matériau durci. Elles sont généralement néfastes aux propriétés mécaniques car sources de défauts. On cherche alors à limiter leurs présences dès la mise en œuvre (par choc, vibration ou ajout d'éléments débulleurs). Dans le cas particulier de matériaux subissant des cycles de gel-dégel, la présence de fines bulles a néanmoins un effet bénéfique sur la durabilité. Dans le cas de la fabrication de matériaux poreux isolants tels que le béton cellulaire ou le « béton mousse » (Figure 1. *Bloc de béton cellulaire (gauche) ; Béton mousse (droite)*) l'emprisonnement de nombreuses bulles au sein de la matrice est recherché. Dans le premier cas, les bulles apparaissent par réaction chimique au sein de la matrice liquide, dans le second, les bulles sont introduits par un canon à air. Le recours à des ajouts tensioactifs permet de les stabiliser dans le fluide jusqu'à la prise [SAM 12].



**Figure 1.** *Bloc de béton cellulaire (gauche) ; Béton mousse (droite)*

Afin d'ajuster le comportement rhéologique de telles suspensions très concentrées, ces mélanges contiennent généralement des ajouts chimiques visant à modifier les propriétés du mélange ou du matériau durci : fluidifiant, accélérateur de prise.... Sur le plan rhéologique, un tel mélange est un fluide à seuil. Les deux modèles rhéologiques les plus courants pour caractériser de telles suspensions concentrées sont les modèles d'Herschel-Bulkley et de Bingham. [COU 02] :

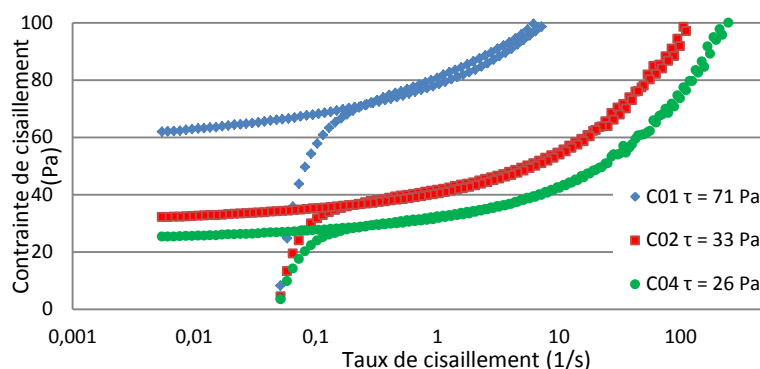
$$\tau = \tau_0 + k\gamma^n \quad [1]$$

où  $\tau_0$  représente le seuil de contrainte,  $k$  la consistance et  $n$  l'index d'écoulement. Le modèle de Bingham correspond au cas particulier où  $n = 1$ . Evaluer les conditions de stabilité d'une bulle dans un fluide à seuil potentiellement adjuvanté de tensio-actifs s'avère nécessaire. Dans la littérature, de nombreux travaux portent sur l'étude du mouvement d'inclusions solides ou gazeuses dans des fluides newtoniens [BLA 97]. Cependant, la littérature concernant les inclusions gazeuses dans les fluides à seuil est plus rare [MOU 12]. Ces articles traitent du comportement d'une bulle unique [SIK 09], en mouvement [MOU 12], et plus rarement des phénomènes de coalescence [KAZ 08].

L'opacité des suspensions concentrées ne permet pas l'observation directe de comportement des bulles. Dans cette étude, nous nous sommes intéressés plus particulièrement à l'effet du seuil de mise en écoulement. Nous avons donc choisi d'utiliser un fluide modèle, à seuil et transparent, le Carbopol 676. Les matériaux et protocoles expérimentaux déployés sont présentés dans une première partie. Le domaine de validité des expériences est ensuite décrit. L'influence de la valeur du seuil du fluide sur la forme et la taille des bulles est évaluée dans une troisième partie. Enfin, la stabilité à l'arrêt d'une puis de deux bulles est étudiée au regard du dosage en tensio-actif. Le « pickering effect » conduisant à la stabilisation d'une interface par interposition de micro particules hydrophobes [GON 07] ou d'une phase hydrophobe en émulsion [CAN 10] n'est pas considéré dans cette analyse.

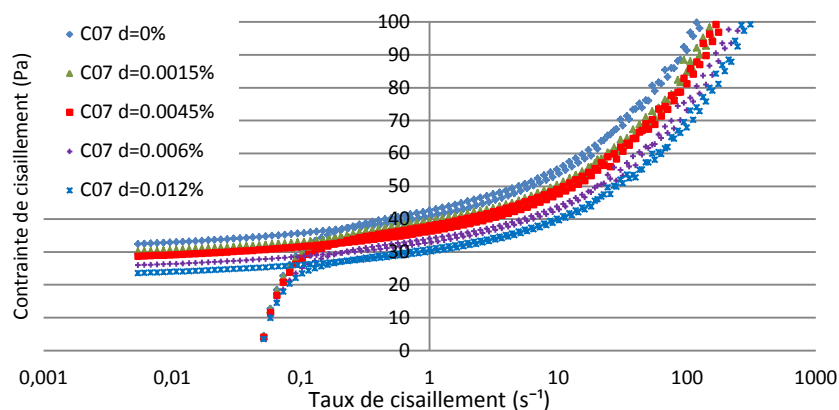
## 2. Matériaux et protocole expérimental

Afin de visualiser le comportement des bulles, on utilise un fluide modèle transparent, le carbopol 676. La poudre de carbopol est ajoutée à l'eau puis l'ensemble est neutralisé à la soude. Le seuil de ce gel augmente avec la concentration en carbopol. Afin d'assurer une bonne homogénéité du gel, il est longuement mélangé (6h minimum) avant chaque expérience. Le comportement rhéologique du gel est identifié à l'aide d'un rhéomètre (Kinexus – Malvern®) avec une géométrie plan-plan (essai à taux de cisaillement imposé – Figure 2. *Rhéogramme de trois carbopols différents*).



**Figure 2.** *Rhéogramme de trois carbopols différents*

La plupart des suspensions concentrées utilisées dans les applications bâtiments contiennent divers adjuvants. On étudie ici plus particulièrement l'influence d'un dosage  $d$  en tensioactif sur les propriétés rhéologiques d'une solution de carbopol (C07  $d = 0\%$ ,  $\tau = 37$ Pa). L'adjuvantation progressive est réalisée avec un tensio-actif anionique, couramment utilisé dans la fabrication de matériaux isolants, l'OSB Hostapur® [SAM 12]. L'augmentation de  $d$  conduit à une diminution du seuil. Cette diminution atteint 40% avec un ajout de seulement 0.024 %. La viscosité ne semble pas affectée. Les paramètres du modèle de Herschel-Bulkley sont rassemblés dans le Tableau 1 pour les différents carbopols utilisés.



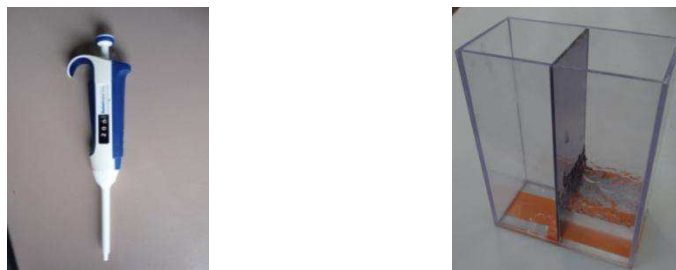
**Figure 3.** Rhéogramme du carbopol C07 pour différents dosages en tensioactif

**Tableau 1.** Paramètres du modèle d'Herschel-Bulkley (équation 1)

Carbopol	dosage tensioactif	concentration carbopol %	$\tau_0$ (Pa)	$k$ (Pa $^{-n}$ )	$n$
C01	0	0,271	71	12,02	0,351
C02	0	0,214	33	9,02	0,199
C04	0	0,272	26	11,68	0,161
C07-d1	0	0,356	37	9,02	0,195
C07-d2	0,0015	0,356	34	8,45	0,18
C07-d3	0,003	0,356	34	8,7	0,18
C07-d4	0,0045	0,356	32,5	8,87	0,181
C07-d5	0,006	0,356	29,5	7,83	0,18
C07-d6	0,012	0,356	27	7,25	0,158
C11-c1	0,003	0,44	34	10,66	0,179
C11-c2	0,003	0,396	27	9,6	0,155
C11-c3	0,003	0,356	18	8,68	0,114
C11-c4	0,003	0,321	15	7,23	0,1
C10-c1	0	0,44	40	9,294	0,1979
C10-c2	0	0,396	27	7,316	0,1434
C10-c3	0	0,356	18	7,312	0,0996
C10-c4	0	0,321	13	5,932	0,0857

Le carbopol est placé dans un container en plexiglas à base carrée (9 x 9 cm<sup>2</sup>) (Figure 4). De nombreux petits trous (diamètre de 1 mm) régulièrement espacés sont percés sous la base de ce dernier afin de permettre l'insertion d'une aiguille permettant l'injection de bulles d'air. L'injection des bulles est réalisée à l'aide d'une micropipette à volume variable ( $20 < V < 200 \mu\text{l}$  ou  $100 < V < 1000 \mu\text{l}$ ) (Figure 4). La pression d'air dans la bulle est quant à elle mesurée lors de l'injection à l'aide d'un manomètre à capsule (précision  $\pm 0.001 \text{ MPa}$ ).

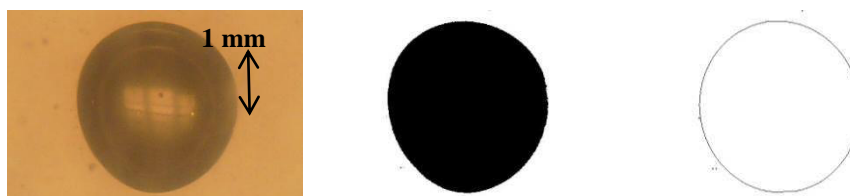
Le volume réel des bulles injectées est obtenu par traitement d'image à l'aide du logiciel ImageJ (freeware). La procédure de traitement des images est préalablement étalonnée en insérant un objet cylindrique de taille connue dans le carbopol à l'endroit où sont situées les bulles.



**Figure 4.** Seringue à volume variable ; Container plexiglas

On obtient ainsi l'aire d'un pixel  $A_{\text{pix}} = 3,02 \cdot 10^{-4} \text{ mm}^2$ . La bulle est prise en photo puis l'image est binarisée. Le logiciel nous fournit le nombre de pixel appartenant à l'aire noire puis trace le contour de l'ellipse équivalente. L'étalonnage précédemment effectué nous permet de revenir à l'aire en  $\text{mm}^2$  (Ici,  $A = 21.2 \text{ mm}^2$ ) et à la longueur des demi axes ( $a = 2,45 \text{ mm}$  ;  $b = 2,13 \text{ mm}$ ). On suppose la bulle axisymétrique suivant le demi grand-axe, le volume de la bulle est :

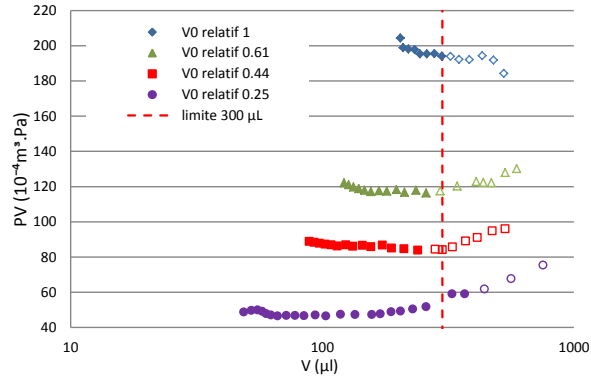
$$V = \frac{4}{3} \pi a b^2 \quad [2]$$



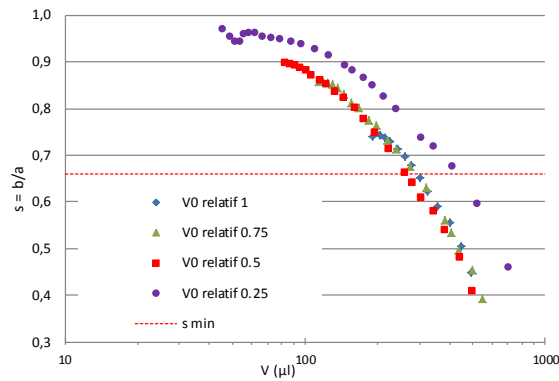
**Figure 5.** Analyse d'image ; Image initiale (gauche) ; image binarisée (centre) ; ellipse équivalente (droite)

### 3. Domaine de validité des résultats

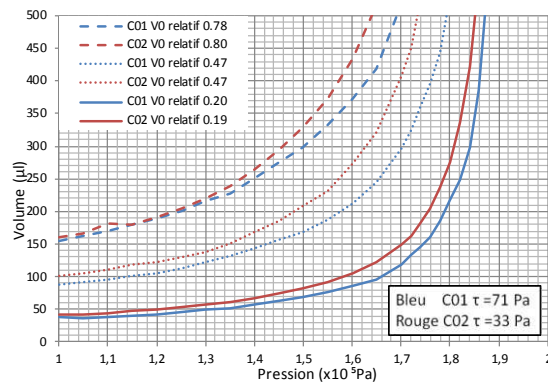
Une première bulle est injectée dans le fluide, sa pression interne est mesurée. Puis l'air est injecté progressivement dans la bulle, le volume est mesuré par traitement d'image à chaque palier de 0,02 Pa. L'opération est répétée pour quatre volumes relatifs initiaux différents (1, 0.61, 0.44 et 0.25) dans le carbopol C01 ( $\tau = 71 \text{ Pa}$ ). Le volume relatif  $V/V_0$  correspond au rapport entre le volume mesuré par traitement d'image et le volume maximal injectable  $V_0 = 200 \mu\text{l}$ . En grossissant la bulle reste dans un premier temps sphérique. Au-delà d'environ  $300 \mu\text{l}$ , la bulle est devenue trop grosse, elle se déforme, devient de moins en moins sphérique et finit par remonter à la surface par poussée d'Archimède. La Figure 6 montre que la loi des gaz parfaits est valide :  $PV = \text{constante}$ . A partir d'un volume de  $300 \mu\text{l}$ , le traitement d'image ne permet plus une bonne estimation du volume de la bulle, en raison de sa perte de sphéricité. Le critère de sphéricité  $s = b/a$  (avec  $a$  = rayon majeur et  $b$  = rayon mineur de l'ellipse) est introduit. Le volume limite correspond globalement à une valeur du critère de sphéricité de 0,66, au-delà l'exploitation de l'analyse d'image devient difficile (Figure 7).



**Figure 6.** C03 ( $\tau = 26$  Pa) Variation du produit  $P.V$  en fonction du volume



**Figure 7.** Variation du critère de sphéricité en fonction du volume



**Figure 8.** Evolution du volume en fonction de la pression relative

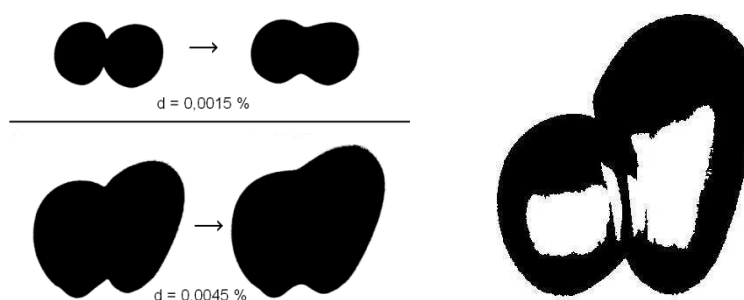
#### 4. Influence du seuil de cisaillement sur la croissance des bulles

Afin de montrer l'influence du seuil de cisaillement du fluide sur la croissance des bulles, trois bulles de tailles relatives différentes sont insérées dans deux gels de

carbopol (C01  $\tau = 71$  Pa et C02  $\tau = 33$  Pa). Le volume est augmenté par injection et mesuré par pas de 0,02 MPa de la pression d'injection. On constate Figure 8 que, quel que soit le volume relatif initial injecté, une augmentation de volume donnée est obtenue pour une variation de pression relative moindre pour le gel C02.

### 5. Influence du dosage en tensioactif sur la stabilité du contact entre bulles

Les bulles enfermées dans les suspensions peuvent être amenées à entrer en contact. Ces phénomènes se rencontrent très souvent dans l'élaboration de matériaux à forte porosité [SAM 12].



**Figure 9.** Contours des bulles avant puis après rupture de la membrane (gauche) ; Contact entre 2 bulles de tailles différentes (droite)

Nous avons vu dans le précédent chapitre que l'insertion de tensio-actif modifiait les propriétés rhéologiques du gel de carbopol. Les conditions de contact entre bulles sont également influencées. Afin de visualiser le phénomène, deux bulles de volumes relatifs égaux ( $V/V_0 = 0,5$ ) sont insérées à une distance fixée l'une de l'autre, à l'aide de la micropipette. Leurs volumes sont simultanément augmentés. L'essai est réalisé avec deux dosages en tensio-actif (Figure 9). Lorsque le milieu n'est pas adjuvanté, la coalescence entre les bulles est immédiate, aucune membrane ne sépare les bulles.

Le dosage en tensio-actif de 0,0015% conduit à la création d'une membrane entre les bulles (Figure 9- gauche haut). Le volume relatif d'une bulle juste avant la rupture atteint en moyenne 0,86. Lorsqu'on multiplie par trois le dosage en tensio-actif, la membrane est plus solide (Figure 9- gauche bas). Le volume relatif moyen d'une bulle atteint 3,15 juste avant rupture. Les dosages supérieurs à  $d = 0,0045$  % ne sont pas présentés ici, la membrane étant très solide, la coalescence n'a pas lieu, les bulles finissent par remonter par poussée d'Archimède. Un faible apport de tensio-actif permet donc une amélioration considérable du maintien des bulles au sein du carbopol. Les phénomènes de coalescence sont stoppés.

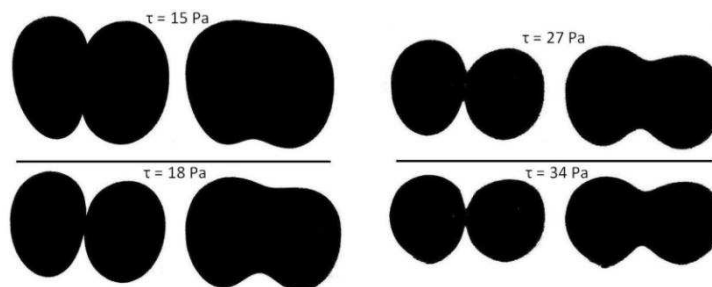
Au sein d'une suspension, les bulles enfermées n'ont pas forcément la même taille. Les conditions de maintien entre deux bulles de tailles différentes sont étudiées. Deux bulles sont insérées de volume relatif  $V_1 = 0,25$  et  $V_2=0,75$ . La présence d'un dosage en tensio-actif  $d = 0,003$  % permet la formation d'une



membrane stable au contact. La différence de taille et donc de pression au sein des bulles se traduit par l'apparition d'une membrane courbe. La pression est supérieure dans la bulle de gauche (Figure 9-droite) ce qui explique la pénétration de cette dernière dans celle de droite. La Figure 9-droite obtenue par traitement d'image permet de visualiser le phénomène.

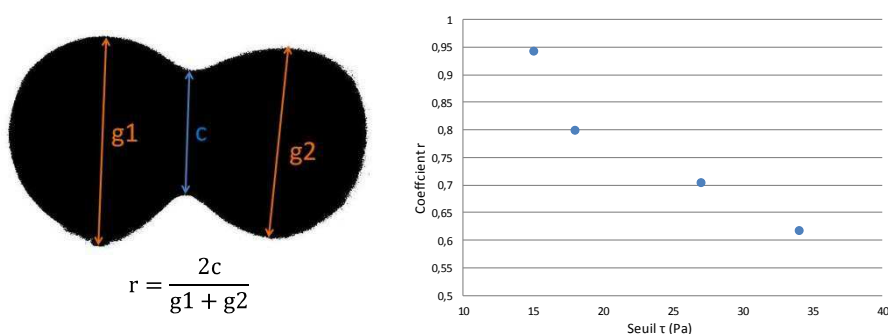
## 6. Influence du seuil sur la forme des bulles

Lors de la fabrication de matériaux cimentaires, les bulles enfermées au sein de la suspension sont amenées à se rencontrer. L'évolution du seuil au cours du temps, lors de la prise, engendre une modification des conditions de coalescence. Pour étudier un tel cas, deux bulles de volume relatif  $V = 0.5$  distantes de 2 mm sont introduites dans 4 carbopols de seuils différents. Le dosage en tensioactif est identique dans ces 4 carbopols,  $d = 0.003\%$ . La Figure 10 montre le phénomène de coalescence pour ces 4 seuils.



**Figure 10.** Evolution des conditions de coalescence en fonction du seuil ; avant rupture (gauche) ; après rupture droite

Lorsque le seuil augmente, les deux bulles croissent moins facilement et conservent plus facilement leurs formes initiales, même après coalescence. A la coalescence, le seuil de cisaillement conserve la forme des bulles et s'oppose à l'effet de la tension de surface qui tend logiquement à former une bulle sphérique de surface minimale (bulle unique).



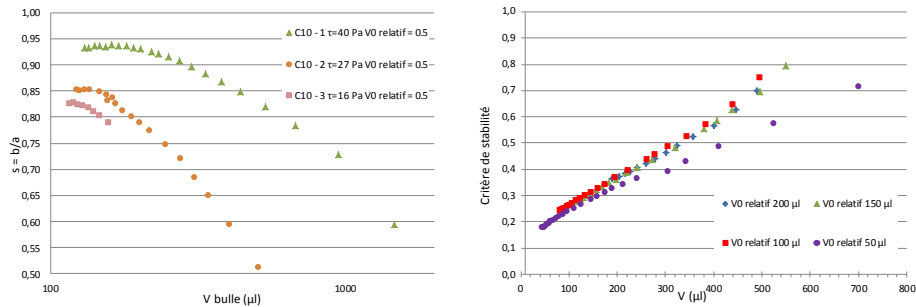
**Figure 11.** Définition et évolution du coefficient  $r$  en fonction du seuil

Le contour des bulles associées constitue un indicateur direct de l'amplitude du seuil de cisaillement. A cette fin un indicateur géométrique  $r$  peut être proposé.  $r$  est le rapport entre la longueur de la connexion  $c$  créée entre les deux bulles et la moyenne des résidus des deux grands axes principaux  $g_1$  et  $g_2$  ( Figure 11-gauche).

L'évolution de  $r$  en fonction du seuil de cisaillement ( Figure 11-droite) retraduit les observations de la Figure 10. Afin de mettre en évidence l'impact du seuil de cisaillement sur la forme prise par une bulle, une bulle de volume relatif  $V = 0.5$  est injectée dans trois carbopols de seuils différents (C10-c1  $\tau=40\text{Pa}$  ; C10-c2  $\tau=27\text{Pa}$  ; C10-c3  $\tau=16\text{Pa}$ ). La poursuite de l'injection se traduit par une évolution de la sphéricité de la bulle (Figure 12). La sphéricité initiale des bulles injectées est plus marquée pour le gel ferme (C10-c1). Pour les gels fermes, l'augmentation du volume de la bulle n'est pas associée à une modification de la sphéricité. La croissance du volume reste isotrope. Pour un volume suffisant, la forme de la bulle évolue. Sa croissance devient unidirectionnelle. La sphéricité décroît rapidement (Figure 12). A l'extrême, la bulle remonte vers la surface libre. A cet instant, les conditions de stabilité de la bulle ne sont plus satisfaites. La stabilité de la bulle résulte du couple de la poussée d'Archimède avec la force de traînée opposé au mouvement par le fluide à seuil. La poussée d'Archimède est une fonction du volume de fluide déplacé et de la différence de masse volumique. La force de traînée d'une sphère immergée dans un fluide à seuil fait intervenir le maître couple, la valeur du seuil de cisaillement. Lors des essais, nous avons constaté que l'augmentation de volume d'une bulle de faible sphéricité correspondait l'expansion de sa partie supérieure, sa partie inférieure demeurant immobile. En conséquence, nous considérons la moitié de l'effort de traînée d'une sphère immergée. La stabilité de la bulle est garantie si :

$$6\pi\tau b^2 > \Delta\rho g \frac{4}{3}\pi ab^2 \text{ soit } \frac{2}{9\tau}\Delta\rho g a < 1 \quad [3]$$

L'évolution de la stabilité est présentée sur la Figure 12. Le critère de stabilité est vérifié pour l'ensemble des bulles et tend pour sa valeur critique pour les bulles de grandes tailles pour lesquelles nous avons constaté la perte de stabilité durant l'incrément de volume suivant.



**Figure 12.** Evolution des critères de sphéricité et de stabilité en fonction du volume

## 7. Conclusion

Les conditions de formation, de croissance, de stabilité, l'évolution de la forme des bulles dans un fluide à seuil partiellement représentatif d'une suspension minérale sont assez différentes de celles attendues dans un fluide newtonien. L'utilisation d'un fluide à seuil modèle, transparent montre que :

- L'introduction d'un tensio-actif, favorable à la stabilité de la paroi d'une bulle induit une réduction du seuil de cisaillement.
- Le dosage en tensio-actif est un paramètre important pour la stabilité d'une interface entre deux bulles en contact. Le risque de coalescence est alors maîtrisé. La formation d'une courbure de la membrane au contact de deux bulles de diamètres différents est alors possible.
- Un seuil de cisaillement élevé favorise la production de bulles sphériques et la conservation de cette sphéricité dans une gamme de volume étendue.
- La stabilité des bulles dans un fluide à seuil se traduit par une forte anisotropie de la croissance des bulles avant leur remontée sous l'effet de la poussée d'Archimède.

## 8. Bibliographie

- [BLA 97] BLACKERY, J. ET MITSOULIS, E. « Creeping motion of a sphere in tubes filled with a Bingham plastic material » *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* 70, 1997, 59-77.
- [COU 02] COUSSOT, P., GROSSIORD, J.L. « Comprendre la rhéologie ». EDP Sciences 2002.
- [KAZ 08] KAZAKIS, N.A., MOUZA, A.A. ET PARAS, S.V. « Coalescence during bubble formation at two neighbouring pores: An experimental study in microscopic scale ». *Chemical Engineering Science* 63, 2008, 5160-5178.
- [MOU 12] MOUGIN, N., MAGNIN, A., PIAU, J.-M. « The significant influence of internal stresses on the dynamics of bubbles in a yield stress fluid » *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 171-172, March 2012, 42-55
- [SAM 12] SAMSON, G., PHELIPOT-MARDELE, A., LANOS, C., ET BAUX, C. « Influence du tensio-actif sur les propriétés des gypses cellulaires. » *XXXème Rencontres de l'AUGC-IBPSA Construction Durables*, Chambéry, France, 2012, 10p.
- [SIK 09] SIKORSKI, D., TABUTEAU, H. ET DE BRUYN, J.R. « Motion and shape of bubbles rising through a yield-stress fluid ». *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* 159, 2009.
- [GON 07] GONZENBACH, T., D., STUDART, A. ET TERVOORT, E. « Macroporous ceramics from particle-stabilized wet foams ». *Journal of American Ceramic Society* 90, 2007, 16-22.
- [CAN 02] CANTAT, I., COHEN-ADDAD, S., GRANER, F. « Mousse liquides : structure et dynamique ». Belin 2010.